



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PETRI HOLOPAINEN  
TEKNOLOGISEN SINGULARITEETIN ENNUSTEEN  
KIRJALLISUUSARVIOINTEJA

Kandidaatintyö

Tarkastaja:Tiina Schafeitel-Tähtinen  
Jätetty tarkastettavaksi 29.4.2018

## TIIVISTELMÄ

### **PETRI HOLOPAINEN: TEKNOLOGISEN SINGULARITEETIN ENNUSTEEN KIRJALLISUUSARVIOINTEJA**

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 24 sivua

Toukokuu 2018

Tietotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Ohjelmistotuotanto

Tarkastaja: Tiina Schafeitel-Tähtinen

Avainsanat: teknologinen singulariteetti, ennustaminen, kiihtyvien tuottojen laki, aivojen simulointi, supertekoäly, vahva tekoäly, toteutumivuosi

Ray Kurzweilin kirjassa *The Singularity is Near: when humans transcend biology* esittää teknologisen singulariteetin toteutumisesta ennustus, joka on herättänyt runsasta keskustelua. Työn tarkoituksena on tehdä kirjallisuustutkimus, jossa esitellään kirjallisuusarviointeja tälle ennustukselle.

Teknologiselle singulariteetille työssä on valittu suppea määritelmä, jota myös käytetään rajauksena työssä. Teknologinen singulariteetti on hetki, jolloin tekoäly on kehittynyt siihen pisteeseen, että sen älykkyys ylittää yhden ihmisen älykkyyden. Tämän jälkeen se pystyy analysoimaan koodin, jolla se on itse toteutettu ja luomaan itsestään paremman version ja se taas paremman version. Tämä aiheuttaa totaalisen muutoksen ihmiskunnan kehityksessä, jossa mitkään vanhat säännöt eivät enää pidä paikkansa ja tätä kehitystä ei voi enää pysäyttää, eikä voida palata tilanteeseen ennen sitä.

Teknologisen singulariteetin toteutumiselle Kurzweilin kirjassa annetaan kaksi reunaehto, joiden täytyy toteutua ennustettuun aikaan mennessä. Ensimmäinen reunaehto on, että tietokoneiden nopeuden ja muistikapasiteetin kasvun on jatkuttava nykyisellä eksponentiaalisella kasvukäyrällä. Toinen reunaehto on, että ihmisaivojen tutkimus saavuttaa tason, jolla ihmisaivot voidaan mallintaa kokonaan simuloitavaksi tietokoneelle. Näiden lisäksi tarkastellaan ennustetun tapahtumahetken laskemista.

Kurzweilin kirjan ennustukset vaikuttavat liian optimistisilta. Liian monia epävarmuustekijöitä on jätetty huomioimatta. Teknologisen singulariteetin toteutuminen vaikuttaa kirjallisuustutkimuksen perusteella hyvin mahdolliselta, mutta saatamme joutua odottamaan sen toteutumista hieman pidempään. Kurzweilin ennustama toteutumivuosi 2045 vaikuttaa olevan liian aikaisin.

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	5
2.	TEKNOLOGINEN SINGULARITEETTI .....	6
	2.1 Teknologisen singulariteetin käsitehistoria .....	6
	2.2 Reunaehdot singulariteetin toteutumiselle .....	6
	2.2.1 Kiihtyvien tuottojen laki .....	7
	2.2.2 Ihmisaivojen simulointi tietokoneella .....	10
	2.3 Ennustetun tapahtumahetken laskeminen .....	12
3.	TEKNOLOGISEN SINGULARITEETIN ARVIOINTEJA .....	13
	3.1 Valitut kirjallisuusarvioinnit .....	13
	3.2 Kiihtyvien tuottojen laki .....	14
	3.3 Ihmisaivojen simulointi tietokoneella .....	16
	3.4 Ennustettu toteutumishetki .....	17
4.	YHTEENVETO .....	21
	LÄHTEET .....	23

## KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Tietokoneen suorituskyvyn kasvu 1900-luvun aikana, perustuu lähteeseen [3].</i>	7
<i>Kuva 2. Integroitujen piirien tehonkulutus per MIPS 1970—2015, perustuu lähteeseen [3].</i>	8
<i>Kuva 3. Eksponentiaalinen vastaan lineaarinen kasvu ja polvikohta, perustuu lähteeseen [3].</i>	9
<i>Kuva 4. Kajoamattoman (noninvasive) aivojen skannaustarkkuuden kehitys 1970—2000, perustuu lähteeseen [3].</i>	10
<i>Kuva 5. Aivojen skannausnopeuden kehitys 1970—2005, perustuu lähteeseen [3].</i>	11
<i>Kuva 6. S-käyrä vastaan eksponentiaalinen käyrä, perustuu lähteeseen [12].</i>	15
<i>Kuva 7. Ennustettuja singulariteetin toteutumisasiä, perustuu lähteeseen [10].</i>	18

## TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1. Haastattelututkimusten tuloksia ihmisen tasoisen tekoälyn toteutusvuodesta, perustuu lähteeseen [11].</i>	19
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

bitti	pienin digitaalisen informaation yksikkö, bitin tila voi olla nolla tai yksi
cps	engl. calculations per second, laskentaoperaatiota sekunnissa
flops	engl. floating point operations per second, liukulukuoperaatiota sekunnissa
GPU	engl. graphics processing unit, grafiikkaprosessori
MIPS	engl. million instructions per second, miljoonaa käskyä sekunnissa
PB	engl. petabyte, petatavu, $10^{15}$ tavua
SSD	engl. solid state disk, massamuisti, joka ei sisällä liikkuvia osia
tavu	digitaalisen informaation yksikkö, tavussa on 8 bittiä, tavulla voi olla $2^8$ (256) eri tilaa
TB	engl. terabyte, teratavu, $10^{12}$ tavua

# 1. JOHDANTO

John von Neumannin, tunnetun informaatioteoreetikon, kirjoitetaan sanoneen 1950-luvulla: ”Jatkuvasti nopeutuva teknologinen kehitys ja muutokset ihmisten elämässä antavat ennusteen jonkinlaisesta singulariteetista ihmiskunnan historiassa, jossa asioiden hoitaminen, kuten ne nyt tunnemme, ei voi jatkua” [1]. Tällä yhdellä lauseella hän loi aiheen tulevaisuuden tutkimukseen ja tätä on tutkittu aina siitä asti. Ajankohtaisen aiheesta ovat tehneet esimerkiksi Stephen Hawking, Elon Musk ja Vernor Vinge antamalla varoittavia lausuntoja, joiden mukaan tekoäly voisi aiheuttaa maailmanlopun [2]. Tästä syystä teknologinen singulariteetti voisi olla tärkein hetki ihmiskunnan historiassa.

Teknologinen singulariteetti on hetki, jolloin tekoäly on kehittynyt siihen pisteeseen, että sen älykkyys ylittää yhden ihmisen älykkyuden. Tämän jälkeen se pystyy analysoimaan koodin, jolla se itse on toteutettu ja luomaan itsestään paremman version ja se taas paremman version. Tämä aiheuttaa totaalisen muutoksen ihmiskunnan kehityksessä, jolloin mitkään vanhat säännöt eivät enää pidä paikkansa ja tätä kehitystä ei voi enää pysäyttää, eikä voida palata tilanteeseen ennen sitä. [3, luku 1] Käsitteelle on laajempiakin määritelmiä, mutta työssä käytetään tätä suppeampaa määritelmää rajauksena.

Työn tarkoituksena on tehdä kirjallisuustutkimus, jossa esitellään kirjallisuusarvioiteja ennustukselle teknologisen singulariteetin toteutumisesta. Työssä arvioitava ennustus esitetään Ray Kurzweilin kirjassa *The Singularity is Near: when humans transcend biology* [3]. Tähän kirjaan viitataan jatkossa termillä Kurzweilin kirja. Näiden esittelyjen tarkoituksena on antaa lukijalle käsitys, miten hyvin ennustus ja sen perustelut on hyväksytty muiden kirjoittajien taholta. Tässä käytetään hyväksi sitä tosiasiaa, että ennustus on jo 13 vuotta vanha ja muut kirjoittajat ovat voineet käyttää sen jälkeen jo tapahtunutta historiaa apunaan arvioita tehdessään. Tarkoitus ei ole käydä läpi kaikki mahdollisia kirjallisuusviittauksia, vaan löytää riittävän kattava otos, jotta lukija voi muodostaa käsityksen ennustamisen onnistumisesta tähän päivään mennessä. Aiheen käsittely rajataan kirjassa esitetyistä ennustuksista tietokoneella toteutettavan tekoälyn mahdollistamaan teknologiseen singulariteettiin. Käsittelyssä on rajattu pois sosioekonomiset tekijät ja uskonnolliset argumentit. Myöskään ei oteta kantaa ihmisten aktiivisiin toimiin teknologisen singulariteetin syntyminen estämiseksi.

Ensin tutustutetaan lukija aiheeseen esittelemällä teknologinen singulariteetti. Sen jälkeen esitellään Kurzweilin kirjassa kuvatun ennustuksen toteutumiseen tarvittavat edellytykset. Kiihtyvien tuottojen laki on niistä ensimmäinen. Toinen on aivojen tutkimusmenetelmien kehittyminen tasolle, joka mahdollistaa aivojen takaisinmallintamisen tietokoneella. Lisäksi esitetään laskettu ennuste teknologisen singulariteetin toteutushetkeksi näiden tietojen perusteella. Tämän jälkeen paneudutaan ennustuksen ja perustelujen saamiin puoltaviin ja vastustaviin kirjallisuusarvioihin.

## 2. TEKNOLOGINEN SINGULARITEETTI

### 2.1 Teknologisen singulariteetin käsitehistoria

Singulariteetin käsite tulee matematiikasta ja astrofysiikasta. Matematiikassa singulariteetti on piste, jossa funktion arvoa ei ole määritelty. Astrofysiikassa singulariteetilla kuvataan mustaa aukkoa. Se on piste tai alue, jossa painovoima on niin suuri, että mikään ei pääse pakenemaan sieltä. Tämä koskee myös valoa. Sen sisällä tunnetut fysiikan lait eivät pidä paikkansa, koska gravitaatio on sen sisällä ääretön. [3, luku 1]

Termin teknologinen singulariteetti esittelee ensimmäisenä Vernor Vinge vuonna 1986 tieteisnovellissa *Marooned in Realtime* [4, katso 3]. Hän kehittää käsitettä pidemmälle vuonna 1993 esseessä *The Coming Technological Singularity* [5]. Yleiseen tietoisuuteen käsitteen toi Ray Kurzweil vuonna 2005 kirjallaan *The Singularity Is Near: when humans transcend biology* [3]. Tämä kirja nousi Amazonin menestyskirjaksi tietokirjojen sarjassa.

Johdannon alussa ollut John von Neumannin [1] määritelmä teknologiselle singulariteetille on laajempi kuin tässä työssä käytetty määritelmä. Työn rajaukseksi on valittu Kurzweilin kirjassaan esittämä teknologisen singulariteetin todennäköisin ennustettu toteutumismuutostilanne. Tämä on ihmisaivojen simulointi tietokoneella ja tämän toteutumiselle on kaksi reunaehto.

### 2.2 Reunaehdot singulariteetin toteutumiselle

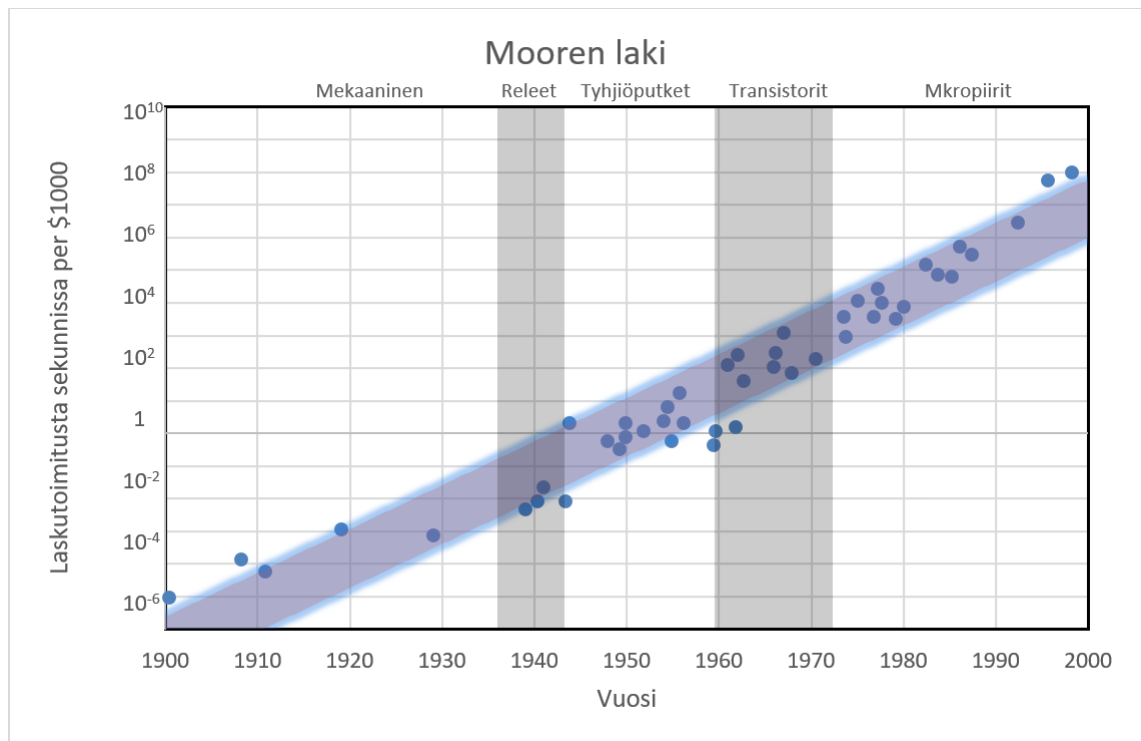
Teknologisen singulariteetin toteutumiselle Kurzweilin kirjassa annetaan kaksi reunaehto, joiden pitää ensin täyttyä. Ensimmäinen reunaehto on, että tietokoneiden nopeuden ja muistikapasiteetin kasvun on jatkuttava nykyisellä eksponentiaalisella kasvukäyrällä. [3, luku 2] Tämä perustellaan kiihtyvien tuottojen lailla luvussa 2.2.1.

Toinen reunaehto on, että ihmisaivojen tutkimus saavuttaa tason, jolla ihmisaivot voidaan mallintaa kokonaan simuloitavaksi tietokoneelle. Tämä tulee vaatimaan lääketieteellisten mittauslaitteiden erotuskyvyn ja nopeuden merkittävää paranemista. [3, luku 4] Tätä käsitellään luvussa 2.2.2

## 2.2.1 Kiihtyvien tuottojen laki

Miten voidaan olettaa nykyisen eksponentiaalisen kasvun tietokoneiden nopeudessa ja muistikapasiteetissa jatkuvan edelleen? Mooren lain rajojen saavuttamista on ennustettu jo moneen kertaan. Fysiikan rajojen on tultava jossain vaiheessa vastaan. Mooren laki ennustaa, että piirilevyille mahtuvien transistorien määrä kaksinkertaistuu joka 18 kuukauden välein. Tämä taas on osaltaan mahdollistanut tietokoneiden nopeuden kaksinkertaistumisen vieläkin nopeammin, koska jatkuvasti tehdään muitakin innovaatioita. [3, luku 2]

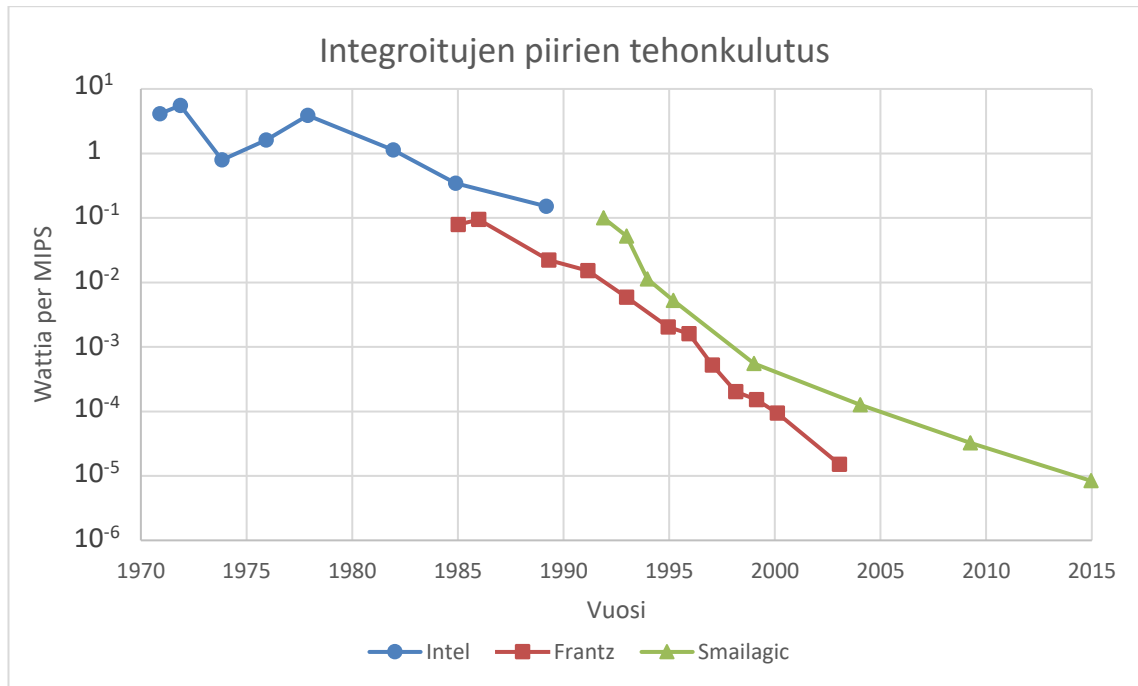
Tietokoneiden kehityksessä on käyty jo useita ajatusmallien muutoksia läpi. Ensimmäiset tietokoneet olivat mekaanisia. 1930-luvulla tulivat reletietokoneet. Seuraava sukupolvi toteutettiin sähköisesti tyhjiöputkilla 1940-luvulla. 1950-luvulla taas transistorit syrjäyttivät elektroniputket. Nykyinen mikropiirien kehitys 1960-luvulta on jatkunut tähän päivään saakka. Jos katsoo tietokoneiden nopeuden kehittymistä alusta asti, eksponentiaalinen kasvu on jatkunut aina tietokoneen keksimisestä asti, ei vain mikropiirien olemassaolon ajan. Kuvassa 1 on tämä kehitys havainnollistettu. Kuvassa on viime vuosisadalta 49 kuuluisaa laskentalaitetta ja tietokonetta. Jokainen piste edustaa kyseisen tietokoneen hinta—suorituskykyä laskettuna käskyä sekunnissa per 1000 dollaria. Yksinkertaisemmin sanottuna, montako käskyä sekunnissa tietokoneen laskentatehoa oli pystynyt ostamaan 1000 dollarilla. [3, luku 2]



**Kuva 1.** Tietokoneen suorituskyvyn kasvu 1900-luvun aikana, perustuu lähteeseen [3].

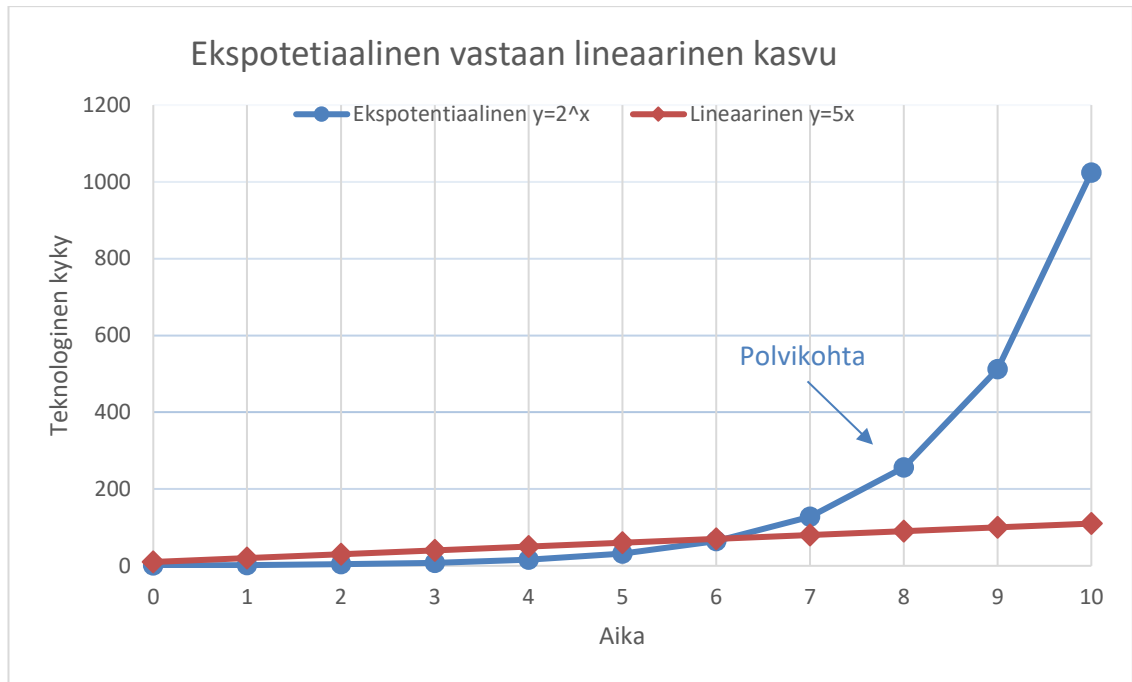


Nykyisen mikropiirien mukaisen ajatusmallin mahdollistama tietokoneiden kehitys pysähtyy jossain vaiheessa. Mikropiirien tilalle täytyy kehittää uusi ajatusmalli, joka taas mahdollistaisi edelleen jatkaa nykyistä kehitysvauhtia. Tietokoneiden kehityksessä ajatusmallia on vaihdettu parempaan jo neljä kertaa viimeisen 100 vuoden aikana, joten on odotettavissa, että historia toistaa taas itseään ja näin tulee tapahtumaan nytkin. [3, luku 2]



**Kuva 2.** Integroitujen piirien tehonkulutus per MIPS 1970–2015, perustuu lähteeseen [3].

Tärkeä tietokoneiden laskentatehoa rajoittava tekijä on tehonkulutus. Kuvassa 2 on esitetty integroitujen piirien tehonkulutuksen kehitys viimeisen 50 vuoden ajalta. Sarjat on nimetty lähteidensä mukaan: Intel (sinisellä), Gene Frantz (punaisella) ja Asim Smailagic (vihreällä). Integroitujen piirien tehonkulutus on laskenut vastaavasti eksponentiaalisesti, kun samaan aikaan laskentateho on kasvanut eksponentiaalisesti. Tämä on mahdollistanut integroitujen piirien pysymisen riittävän viileinä, vaikka suorituskyky on kasvanut. Tehonkulutuksen pieneminen on myös mahdollistanut rinnakkaisprosessoinnin hyödyntämisen. [3, luku 3]

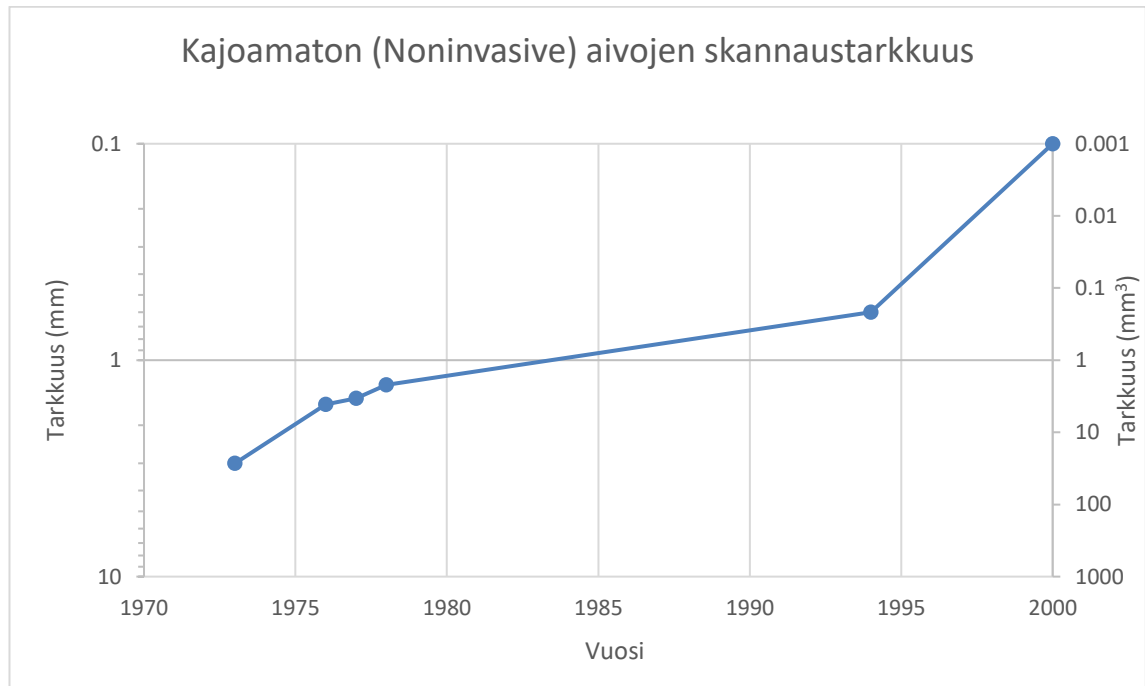


**Kuva 3.** Ekspotentiaalinen vastaan lineaarinen kasvu ja polvikohta, perustuu lähteeseen [3].

Tulevan teknisen kehityksen ennustaminen on vaikeaa, koska ihmiset näkevät yleensä kehityksen lineaarisena, eikä eksponentiaalisena, kuten se on todellisuudessa. Vasta kun jokin tekniikan kehitys ohittaa polvikohtaan, havaitaan kasvun eksponentiaalinen luonne. Kuvassa 3 on osoitettu tämä polvikohta, jolloin kasvun luonne viimeistään paljastuu. Kurzweilin mukaan monet ennustukset saattavat yliarvioida teknisen kehityksen lyhyellä tähtäyksellä ja samalla aliarvioida pitkällä tähtäyksellä. [3, luku 1]

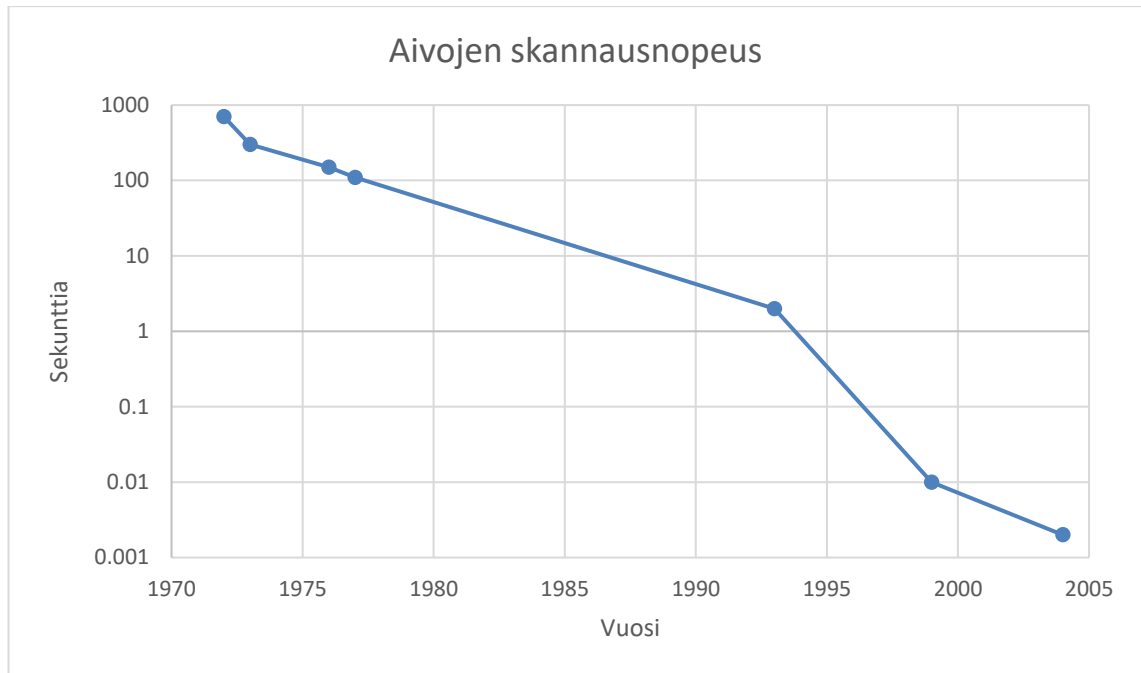
## 2.2.2 Ihmisaivojen simulointi tietokoneella

Ihmisen aivojen simulointi tietokoneella vaatii ensin niiden takaisinmallintamista. Tämä taas vaatii tarkempia avaruudellisia ja ajallisesti nopeampia tapoja tutkia aivoja samanlaisesti, kun ne suorittavat jotain tehtävää. Aivojen eri lohkojen tarkoitusten selvittäminen on jo edistynyt hyvin nykyisillä menetelmillä. Kajoamaton (noninvasive) aivojen tutkimuksen skannaustarkkuus on kehittynyt samalla tapaa eksponentiaalisesti, kun tietokoneiden nopeudet ovat kasvaneet. [3, luku 4]



**Kuva 4.** Kajoamattoman (*noninvasive*) aivojen skannaustarkkuuden kehitys 1970—2000, perustuu lähteeseen [3].

Kuvassa 4 näkyy, miten kajoamaton aivojen skannaustarkkuus on parantunut eksponentiaalista vauhtia. Tilavuudella ( $\text{mm}^3$ ) mitatun skannaustarkkuuden paraneminen on ollut nopeaa. Tämän näkee vertaamalla käyrää oikeanpuoleiseen pystyakseliin, jossa yksikönä on tilavuus. Skannaustarkkuus on parantunut kaksinkertaiseksi keskimäärin 12 kuukauden välein. [3, luku 4]



**Kuva 5.** Aivojen skannausnopeuden kehitys 1970—2005, perustuu lähteeseen [3].

Kuvasta 5 näkee, että myös aivojen skannausnopeudet on kasvaneet eksponentiaalisesti. Nopeutta tarvitaan, jotta pystytään kuvaamaan jokainen neuronin hermopulssi erikseen. Skannausnopeus on jo lähestymässä yksittäisen hermopulssin kestoa. Skannaustarkkuus ja skannausnopeus ennätykset on saavutettu käyttäen eri menetelmiä. Tarkan kuvan aivojen toiminnasta muodostamiseksi tarvitaan menetelmä, jossa tarkkuus ja nopeus on saavutettu yhdellä ja samalla menetelmällä. [3, luku 4]

Kajoamattoman aivojen tutkimuksen lisäksi aivoja voidaan tutkia kajoavasti (invasive). Kajoavat menetelmät tarjoavat keinoja tutkia aivoja tarkkuudella, johon kajoamattomat menetelmät eivät tällä hetkellä pysty. Kajoavat menetelmät vahingoittavat tutkittavia aivoja, joten ne ei sovellu ratkaisuksi aivojen kokonaisvaltaiseen skannaukseen. [3, luku 4]

Aivoista on simuloitu jo pieniä osia, kuten kuulohermot, jotka pystyvät paikantamaan äänilähteen suunnan ja näin eristämään tämän äänen taustamelusta. Näiden simulointien perusteella on tehty arvio koko aivojen tietojenkäsittelykapasiteetista. Arviolta tarvitaan  $10^{11}$  laskentaoperaatiota yhden sekunnin aikana (cps) ihmisen tasaisen äänen paikantamisen saavuttamiseksi. Vastaava aivojen kuuloalue on 0,1% aivojen neuroneista. Kertomalla nämä yhteen saadaan arvio koko aivojen tietojenkäsittelykapasiteetista, eli  $10^{11} \text{ cps} * 10^3 = 10^{14} \text{ cps}$ . Vastaavat muut tutkimukset ovat antaneet samaa suuruusluokkaa olevia arvioita. Koska aivotutkimus on vielä uusi tieteenala, näiden perusteella on päädytty konservatiiviseen  $10^{16} \text{ cps}$  arvioon koko aivojen tietojenkäsittelykapasiteetista. [3, luku 3]

Aivoissa on arviolta  $10^{11}$  neuronina ja  $10^{14}$  synapsia. Neuronin on hermosolu, joka välittää hermoimpulsseja ja synapsi on kahden neuronin välinen yhteys. Neuronin ja synapsin

nollaantumisaika (reset time) on noin 5 ms. Tästä voidaan laskea aivojen synapsiseksi laskentanopeudeksi noin  $10^{16}$  cps. [3, luku 3]

Neuronimallien simuloinneista on ilmennyt, että yhden synapsisen yhteystapahtuman simulointi vaatii  $10^3$  laskutoimitusta tietokoneelta. Kertomalla tämä yhteen edellisen kappaleen aivojen synapsiseen laskentanopeuden kanssa, voidaan laskea koko aivojen simulointiin tarvittavan tietokoneen suorituskyvyksi noin  $10^{19}$  cps. [3, luku 3] Tätä voidaan verrata tämän hetken maailman nopeimpaan supertietokoneeseen. Kiinalaisen supertietokoneen Sunway TaihuLightin suorituskyky on noin  $10^{17}$  cps (93 petaflops) [6]. Sunway TaihuLight pystyisi simuloimaan noin 1% ihmisaivoista. Maailman nopeimman grafiikkaprosessorin (GPU) suorituskyky on noin  $10^{13}$  cps (13.3 teraflops) [8]. Näitä grafiikkaprosessoreita tarvitaan noin 10 000 kappaletta, jotta simuloitaessa saavutetaan 1% ihmis-aivoja vastaava suorituskyky.

Aivoilla on tietojenkäsittelykyvyn lisäksi muistia, joka pitää myös simuloida. Aivoissa on noin  $10^{14}$  synapsia ja kussakin synapsissa on arviolta noin  $10^4$  bittiä tietoa. Kertomalla nämä yhteen saadaan aivojen muistikapasiteetiksi noin  $10^{18}$  bittiä. [3, luku 3] Tämä on 125 PB (petatavu) tietoa, jonka tallettamiseen tarvittaisiin noin 2000 maailman tämän hetken suurinta 60 TB (teratavu) SSD-levyä (solid-state drive) [7].

### 2.3 Ennustetun tapahtumahetken laskeminen

Teknologisen singulariteetin ajankohdan ennustamista varten pitää arvioida milloin tietokoneiden suorituskyky saavuttaa aivojen tietojenkäsittely- ja muistikapasiteetin. Lisäksi pitää arvioida milloin skannausmenetelmät ovat kehittyneet tasolle, jolla aivot kyettään kokonaan mallintamaan tietokoneella. Vasta kun molemmat ehdot toteutuvat, on singulariteetti saavutettavissa. Kurzweilin kirjassa ennustettiin, että vuonna 2020 pystyy 1000 dollarilla ostamaan tietokoneen, joka vastaa ihmisen aivojen suorituskykyä. Myös ennustettiin, että 2020-luvun puolessa välissä tulee olemaan ohjelmistomalleja, joilla voidaan tehokkaasti mallintaa ihmisten älykkyyttä. Tämän lisäksi ennustettiin ennen 2020-luvun loppua olevan tietokoneita, jotka läpäisevät Turingin testin. Läpäistyssä Turingin testissä tietokone keskustelee ihmisen kanssa ja ihminen ei pysty erottamaan, onko keskustelukumppani ihminen vai tietokone. [3, luku 2]

Kurzweilin kirjassa varsinaisen teknologisen singulariteetin toteutumiselle asettaa vielä korkeammat reunaehdot. Teknologisen singulariteetin toteutuminen vaatii perusteellista älykkyyden laajentumista. Tekoälyn pitää pystyä ylittämään koko ihmiskunnan kokonaisälykkyys. Tätä kutsutaan supertekoälyksi. Tämän toteuttaminen arvioidaan vaativan tietokoneen, joka laskentanopeus on  $10^{26}$  cps. Ray Kurzweilin sanoin ”Asetan ajankohdan singulariteetille - joka edustaa perustavaa laatua olevan ja häiritsevän muutoksen ihmisten kyvyissä - 2045”. [3, luku 3]

## 3. TEKNOLOGISEN SINGULARITEETIN ARVIOINTEJA

### 3.1 Valitut kirjallisuusarvioinnit

Vertaisarviointiin on pyritty valitsemaan viime vuosina julkaistuja alan merkittävimpiä teoksia. Näin kirjoittajat ovat voineet käyttää hyväkseen Kurzweilin kirjan kirjoittamisesta kulunutta aikaa ja pystyvät käyttämään jo tapahtunutta historiaa arvoissaan. Julkaisut myös käsittelevät asiaa riittävän syvällisesti ja kirjoittajat ovat arvostettuja alan asiantuntijoita.

Murray Shanahanin kirja *Technological Singularity* [9] on yksi syvällisimpiä kirjoja, joita on julkaistu alalta viime vuosina. Kirjoittaja Murray Shanahan on Imperial College London -yliopiston kognitiivisen robotiikan professori.

Kirja *The Technological Singularity: Managing the Journey* [10] on viimeisin merkittävä teos, joka on alalta julkaistu. Kirjalla on neljä kirjoittajaa: Victor Callaghan on Essexin yliopiston tietojenkäsittelytieteen emeritusprofessori, James D. Miller on Smith yliopiston talouden apulaisprofessori, Roman V. Yampolskiy on Louisvillen yliopiston apulaisprofessori ja Stuart Armstrong on Oxfordin yliopiston filosofian laitoksen tutkija. Kukin kirjoittaja on ottanut oman näkökulmansa aiheeseen.

Kunnianhimoisen ja alkuperäisen *Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies* [11] kirjan on kirjoittanut Nick Bostrom. Hän on Oxfordin yliopiston ihmiskunnan tulevaisuuden instituutin johtaja (Future of Humanity Institute).

*Singularity Hypotheses: A Scientific and Philosophical Assessment* [12] kirja on vähän vanhempi kuin muut valitut teokset, mutta käsittelee aihetta monipuolisesti. Kirjoittajia ovat muun muassa: tietojenkäsittelytieteen apulaisprofessori Amnon H. Eden, moraalifilosofian professori James H. Moor, teknologisen filosofian apulaisprofessori Johnny H. Søraker ja filosofian professori Eric Steinhart.

Vuonna 2007 Ben Goertzellin julkaisema artikkeli *Human-level artificial general intelligence and the possibility of a technological singularity: A reaction to Ray Kurzweil's The Singularity Is Near, and McDermott's critique of Kurzweil* [13] on Kurzweilin kirjan saama arviointi vuosi julkaisun jälkeen. Artikkelissa käsitellään myös Drew McDermottin antamaa arvostelua Kurzweilin kirjasta.

Alexey Potapov on Pietarin valtion yliopiston tietokonefotoniikan ja visuaalisen tiedon laitoksen professori (Computer Photonics and Videomatics). Hän on julkaisut artikkelin

Technological Singularity: What Do We Really Know? [14] Tämä on julkaisu huhtikuussa 2018 ja edustaa uusinta näkemystä työn aiheeseen.

Cadell Lastin artikkeli Cosmic Evolutionary Philosophy and a Dialectical Approach to Technological Singularity [15] antaa filosofian ja dialektiikan näkökulman aiheeseen. Artikkelin on julkaistu huhtikuussa 2018.

### 3.2 Kiihtyvien tuottojen laki

Murray Shanahan käy kirjassaan The Technological Singularity [9] hyvinkin yksityiskohtaisesti Kurzweilin kirjan ennustusta läpi. Shanahan toteaa kyllä kiihtyvien tuottojen lain olemassaolosta olevan todisteita teknologisessä kehityksessä, mutta kritisoi sen perusteella tulevan kehitysvauhdin tarkkaa ennustamista [9, luku 6.2]. Mooren laki osoittaa jo hidastumisen merkkejä ja seuraavaa edistysaskelta ei vielä ole nähty, vaikka siirtymäinen 2D-piirilevyistä 3D-piirilevyihin olisi mahdollisesti se edistysaskel, joka jatkaisi Mooren lain ennustamaa kehitystä vielä jonkin verran pidempään [9, luku 2.5].

Jatkuvasti nopeutuvan teknisen kehityksen rajoittavaksi tekijäksi saattaa osoittautua energiantuotanto. Kurzweil on mahdollisesti aliarvioinut informaation räjähdysen vaatiman energian. Mitä monimutkaisempia järjestelmät ovat, sitä enemmän tarvitaan energiaa niiden ylläpitämiseen. Energiantuotannon kehityksessä tärkeä osa-alue on fysiikan tutkimus, jossa kasvu ei ole ollut eksponentiaalista. Tämä on todennäköisesti tärkein syy, miksi energiantuotannossa ei ole tapahtunut merkittävää kehitystä viime aikoina. Vieläkin noin 85% maapallon energiantuotannosta perustuu fossiilisiin polttoaineisiin. [10, s. 156–159]

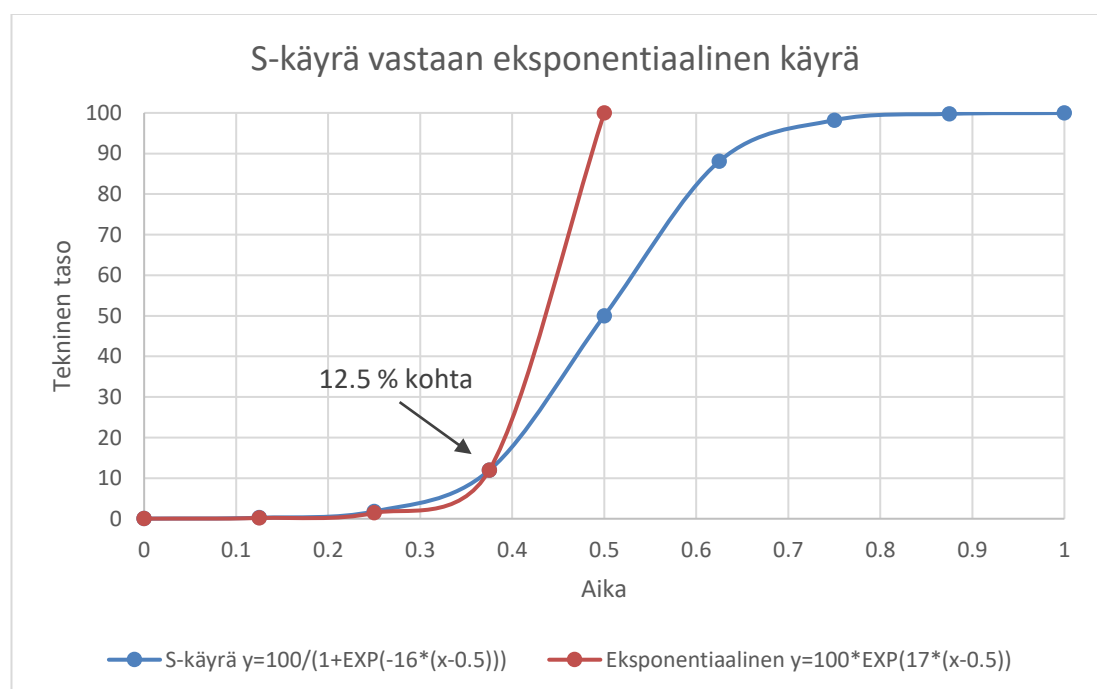
Kiinalainen supertietokone Sunway TaihuLight kuluttaa 15,37 MW (megawatti) energiaa [7]. Luvussa 2.2 olleen arvion perusteella Sunway TaihuLight kykenee simuloimaan 1% ihmisaivoista. Vastaava 100 kertaa tehokkaampi supertietokone tarvitsee 1537 MW energiaa ihmisaivojen simuloimiseksi kokonaan. Tämä vastaa hyvin koko tulevan Olkiluoto 3 -ydinvoimalayksikön 1600 MW energiantuotantoa [16]. Tämä energia riittäisi vasta ihmisen tasoiseen älykkyyden simulointiin. Supertekoälyn energiavaatimukset olisivat monta suuruusluokkaa suuremmat.

Aurinkoenergian tuotanto kasvaa tällä hetkellä eksponentiaalista vauhtia. Nykyinen eksponentiaalinen kasvu ei takaa eksponentiaalista kasvua tulevaisuudessa. Kasvu tulee josain vaiheessa hidastumaan tai pysähtymään [10, s. 160] Olkiluodon 3 – ydinvoimalayksikköä vastaava aurinkovoimala löytyy Kiinan Tenggerin autiomaasta. Tämä aurinkovoimala tuottaa 1550 MW energiaa ja kattaa 43 km<sup>2</sup> alueen. [17] Aurinkovoimalat tarvitsevat runsaasti maapinta-alaa. Aurinkoenergian tuotannolle käytettävissä oleva maata ei ole rajoittomasti maapallolla.

Kirjassaan Nick Bostrom [11] toteaa, ettei käsittele teknologisen kehityksen kiihtymistä. Hän kuitenkin kirjoittaa tätä tukevia ajatuksia kirjan alussa. Ihmisten historia on sarja kasvutapoja, joista seuraava on aina huomattavasti nopeampi kuin edellinen. Tämä antaa olettaa, että nykyistä nopeampi kasvutapa olisi mahdollinen. [11, s. 1]. Edellinen muutos maataloudesta teolliseen yhteiskuntaan nopeutti maailman talouden kaksinkertaistumisen 909 vuodesta 6,3 vuoteen. Uusi kasvutapa voisi mahdollistaa maailman talouden kaksinkertaistumisen kahden viikon välein. [11, s. 2]

Jokainen seuraava merkittävä tietojenkäsittelytieteen keksintö keksitään kaksi kertaa nopeammin kuin edellinen keksintö on tehty. Jos tätä kehityssuuntaa jatketaan tulevaisuuteen, seuraavan merkittävän keksinnön pitäisi ilmestyä ennen vuotta 2020. [12, s. 62]

Kasvukäyrillä on olemassa yksinkertaiset luonnolliset lait. Kasvunopeus on suhteessa siihen, miten paljon kasvua on jo tapahtunut ja miten paljon kasvua on vielä saavutettavissa. Kasvu on hitainta käyrän alussa ja lopussa. Nopeinta kasvu on käyrän keskikohdalla. Tämän kasvukäyrän muotoa voidaan kuvata S-käyräksi. Kaikki S-käyrät käyttäytyvät aluksi kuin eksponentiaalinen käyrä, joten kasvu voi aluksi vaikuttaa eksponentiaaliselta. Myös toisiaan seuraavat S-käyrät muodostavat yhdessä S-käyrän. [12, s. 313-314]



**Kuva 6.** S-käyrä vastaan eksponentiaalinen käyrä, perustuu lähteeseen [12]

Kuvassa 6 on havainnollistettu S-käyrä ja eksponentiaalisen käyrän käyttäytymisen erilaisuus. Voimme olla Mooren lain suhteen 12.5% kohdalla S-käyrällä, jolloin kehitystä olisi enää saavutettavissa 8-kertaisesti nykyiseen tekniseen tasoon verrattuna. [12, s. 317]

Teknologissa on Mooren lain lisäksi monta muuta eksponentiaalista kehityssuuntaa. Esimerkiksi internetiin kytkettyjen tietokoneiden ja aivokuvauksella saatavan tiedon määrä



kasvaa eksponentiaalisesti. Teknologian kehittyessä pidemmälle kasvun eksponentiaalisuus vain lisääntyy. Kasvu vaikuttaa jopa hyperekspontiaaliselta. [14, s. 1]

Evoluutio voidaan jakaa erilaisiin vaiheisiin. Nämä ovat ketju yhä monimutkaistuvia kehitysmalleja. Ensin oli fysikaalinen—kemiallinen evoluutio (physical-chemical evolution). Tämän jälkeen alkoi biokemiallinen evoluutio (biochemical evolution). Nykyistä edeltävä evoluutiovaihe oli biokulttuurillinen (biocultural evolution). Viimeisin meneillään oleva vaihe on teknokulttuurillinen evoluutio (technocultural evolution). [15, s. 5] Tämän kehityksen järjestys ei ole käännettävissä. Se kulkee menneisyydestä tulevaisuuteen nykyhetken kautta. [15, s. 6] Jokainen uusi vaihe kykenee ylläpitämään korkeampaa tiedon järjestystä [15, s. 7].

### 3.3 Ihmisaivojen simulointi tietokoneella

Murray Shanahan [9] arvostelee voimakkaammin ennustusta, jossa tietokoneiden nopeutuminen tulee mahdollistamaan yhtä nopean kehityksen tekoälyn parantumisessa. Tämä olisi mahdollista vain brute force -ratkaisulla, jossa on ensin pystytty kartoittamaan aivojen toiminta kokonaan skannaustekniikoilla ja tämän siirtäminen sellaisenaan tietokoneelle. Nykyinen aivojen täydellinen takaisinmallintaminen vaatisi merkittäviä edistysaskelia saavuttaakseen tämän nykyvauhdilla. Kehitystä on tapahtunut, mutta ei läheskään tarvittavaa vauhtia. [9, luku 6.2]

Jotta ihmisaivoja voisi simuloida, aivot täytyy ensin kopioida (upload) tietokoneeseen. Mutta saattaa olla helpompi kehittää ihmisen tasoinen tekoäly suunnittelemalla ja toteuttamalla se nykyisillä tietokonearkkitehtuureilla. Tämä ratkaisu olisi yhtä helposti hallittavissa kuin ohjelmistoprojekti. Tässä voidaan käyttää vertausta lentokoneen kehittämiseen. On paljon helpompi kehittää lentokone perustuen aerodynamiikkaan, kuin mallintaa ensin lintu ja sitten päivittää lintu riittävän isoksi kantaakseen matkustajia. Vaikka aivojen kopiointi onnistuisikin, ihmisaivojen päivittäminen paremmaksi versioksi itsestään voi osoittautua vaikeaksi. Evoluutio ei kehittänyt ihmisaivoja helposti muutettaviksi ja voi olla vaikea löytää keinoja huomattavasti parantaa simuloituja ihmisaivoja. [10, s. 43] Tämä merkitsisi, että simuloitut ihmisaivot eivät mahdollistaisi supertekoälyä.

Nick Bostromin mukaan ihmisaivojen simuloinnin tietokoneella ei tule onnistumaan lähitulevaisuudessa. Tällä tarkoitetaan vähintään seuraavaa 15 vuotta. Simuloinnin vaatimia edistysaskeleita ei ole vielä saavutettu ja vaadittavia edistysaskeleita on monta. Nämä edistysaskeleet tulevat olemaan selvästi havaittavia ja edistymisen niissä ei tule yllättäen. [11, s. 43]. Vaadittavat edistysaskeleet ovat kuitenkin saavutettavissa myöhemmin [11, s. 37].

Viime aikojen neurotieteiden tutkimustulokset ovat antaneet vihjeitä siitä, miten tietoa käsitellään aivoissa. Nämä tulokset ovat myös johtaneet uusiin tekoälyn ajattelumalleihin. Yksi näistä on syväoppiminen (deep machine learning). Syväoppimisessä tieto esitetään

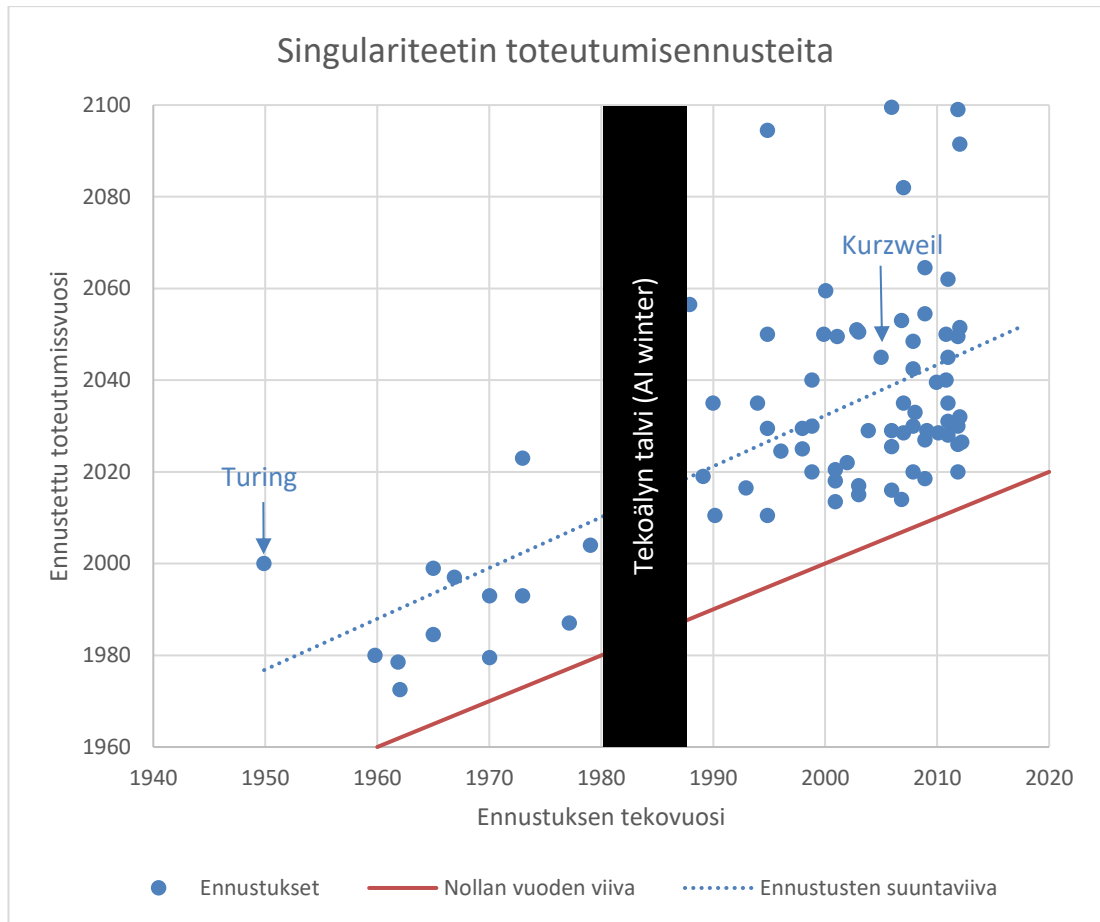
rakenteeltaan hierarkkisesti. Tämä ajattelumalli voi johtaa todella älykkäitten tekoälyjen kehittymiseen lähitulevaisuudessa. Tämän kehityksen voidaan arvella johtavan ihmisen tasoiseen tekoälyyn. [12, s. 44]

Analogisilla piireillä toteutetulla tekoälyllä olisi etuja verrattuna perinteisellä tietokoneella toteutettuun. Analogisella piireillä toteutettu tekoäly tarvitsee vähemmän transistoreja ja energiavaatimukset ovat pienemmät. Haittana olisi pienempi lineaarinen tarkkuus. Ihmisaivotkaan eivät toimi bittien tarkkuudella, joten tästä ei olisi todellista haittaa. [12, s. 54]

Vuonna 2007 IBM oli ilmoittanut simuloineensa puolikasta hiiren aivoa. Tämä tosin oli tapahtunut oikeaan hiiren aivoon verrattuna 10 kertaa hitaammalla nopeudella. Ilmoitus oli kuitenkin hyvin Kurzweilin kirjan ennustaman aikataulun mukainen. [13, s. 1167]

### **3.4 Ennustettu toteutumishetki**

Murray Shanahan [9] ennustaa tarkan vuoden sijaan vain, että teknologinen singulariteetti tapahtuu tällä vuosisadalla. Tarkemman ennustuksen tekeminen olisi turhaa johtuen toteutumisen reunaehtojen epävarmuustekijöistä, joiden takia ennustuksesta ei tulisi tarkka. [9, luku 6.2]



**Kuva 7.** Ennustettuja singulariteetin toteutumisvuosia, perustuu lähteeseen [10].

Kuva 7 perustuu kuvaan kirjasta *The Technological Singularity: Managing the Journey* [10, s. 7]. Kuva on luvusta 1, jonka on kirjoittanut Stuart Armstrong. Kuvaan piirretyt 95 sinistä pistettä ovat tekoölyn ennustettuja toteutumisvuosia. Sininen katkoviiva on näiden ennustusten suuntaviiva ja punainen viiva esittää hetkeä, jolloin toteutumiseen olisi nolla vuotta. Kuvasta nähdään, että ennustuksissa ei ole mitään yhteisymmärrystä, hajoama on suuri ja monta toteutumisvuotta on jo mennyt ohi [10, s. 7]. Ennustusten suuntaviiva on koko ajan noin 30 vuotta tulevaisuuteen. Tästä päätellen singulariteettia ennustetaan jatkuvasti keskimäärin 30 vuoden päähän tulevaisuuteen.

Yli 20 vuotta tulevaisuuteen on teknisille ennustuksille otollinen aikajakso. 20 vuoden aikana on mahdollista saavuttaa ongelmaan ratkaisu, joka ei ole tällä hetkellä näkyvissä. Lyhyemmälle ajalle tehdyn ennustuksen ratkaisuja olisi jo testattavana laboratoriossa. [11, s. 4] Toinen yleinen piirre teknisissä tulevaisuuden ennustuksissa on Maes–Garreau-lain noudattaminen. Lain mukaan ennustettu teknologia keksitään ennustajan elinaikana [10, s. 231]. Ray Kurzweil on syntynyt vuonna 1948. Vuonna 2045 hän olisi 97-vuotias joka on nykyaikana hyvinkin saavutettavissa oleva elinikä. Näin ollen hänen olisi vielä mahdollista olla näkemässä teknologisen singulariteetin toteutuminen.

Milloin ihmisen tasoinen tekoäly toteutuu?			
Todennäköisyys	10%	50%	90%
PT-AI	2023	2048	2080
AGI	2022	2040	2065
EETN	2020	2050	2093
TOP100	2024	2050	2070
Yhdistetty	2022	2040	2075

**Taulukko 1.** Haastattelututkimusten tuloksia ihmisen tasoisen tekoälyn toteutusvuodesta, perustuu lähteeseen [11].

Taulukkoon 1 on kerätty neljän eri haastattelututkimuksen tulokset. Haastattelututkimukset on nimetty ensimmäisessä sarakkeessa. PT-AI (Philosophy and Theory of AI) tehtiin konferenssissa Thessalonikissa 2011. AGI (Artificial General Intelligence) tehtiin kahdessa tekoäly konferenssissa Oxfordissa 2012. EETN (Hellenic Artificial Intelligence Society) on kreikkalaisen tekoälyn tutkijoiden järjestön jäsenten haastattelututkimus vuodelta 2013. TOP100-tutkimuksessa on haastateltu 100 eniten lainauksia saanutta tekoälykirjoittajaa. Tämä tutkimus on tehty vuonna 2013. Näissä neljässä haastattelututkimuksessa antoi arvionsa yhteensä 170 tekoälyn asiantuntijaa. [11, s. 264] Muissa sarakkeissa on toteutumivuodet jaettuna ennustetun todennäköisyyden mukaan sarakkeisiin. Viimeiselle riville on laskettu kaikkien näiden tutkimusten ennusteet yhteen. Taulukon tietojen perusteella on 50% todennäköisyys sille, että ihmisen tasoinen tekoäly toteutuu vuonna 2040 [11, s. 23]. Ihmisen tasoisen tekoälyn jälkeen kestää useita vuosia, ennen kuin kehitetään teknologisen singulariteetin vaatima supertekoäly. Tälle annetaan 75% todennäköisyys toteutua 30 vuodessa ja 10% todennäköisyys toteutua 2 vuodessa [11, s. 24]. Näistä ennusteista saadaan alle 50% todennäköisyys sille, että supertekoäly toteutuu ennen vuotta 2070.

Varovaisempaa näkemystä singulariteetin tulemisesta ei tarvitse juurikaan perustella, kun katsoo viime aikojen ylioptimistisia ennustuksia. On helppo valita historiasta omaa näkemystä tukevia tapahtumia ja saada näin todisteita omalle ennustukselle. Kurzweil on mahdollisesti sortunut tähän ennustuksessaan. 10 000 vuoden ihmishistorian jälkeen ei ole paljon merkitystä, jos ennustus teknologisesta singulariteetista menee väärään muutaman vuosikymmenen. [12, s. 72]

Ben Goertzel arvioi Kurzweilin kirjan ennustuksen aikataulua optimistiseksi [13, s. 1163]. Kurzweilin ennustuksen mahdollisen toteutumisen vaiheet ovat kuvattu hyvin. Kurzweil ei esitä todisteita teknologisen singulariteetin tulemisesta, ainoastaan vakuuttavia argumentteja tapahtuman todennäköisyydestä. [13, s. 1166] Hän myös jättää huomiomatta monia epävarmuustekijöitä, joita tulevaisuus tuo tullessaan. Kurzweil on esittänyt vain yhden mahdollisen kehityskulun monista mahdollisista tulevaisuuden kehityskulusta. [13, s. 1167]

Tulevaisuutta voi ennustaa ekstrapoloiden historiallisista kehityssuunnista jatkaen käyrää pitkin tulevaisuuteen. Yksinkertaisin tapa on jatkaa eksponentiaalista käyrää eteenpäin, aina äärettömyyksiin asti. Tosin nykyisen tieteellisen käsityksen mukaan mikään maailmassa ei voi olla oikeasti ääretöntä. Mutta tämä ei sulje pois teknologisen singulariteetin mahdollisuutta. Vaikka jokin ei olekaan ääretön, voi se olla riittävän lähellä ollakseen käytännössä ääretön. Toinen yksinkertainen tapa ekstrapoloida tulevaisuuteen on S-käyrä. Tässä kasvu on ensin eksponentiaalista ja jossain vaiheessa kasvu hidastuu, kun se lähestyy jotain rajaa. Ei ole olemassa todisteita, että olisimme jo ohittaneet vaiheen, jossa kasvu hidastuu. Vaikka hidastuminen alkaisikin seuraavien vuosikymmenten aikana, ei se riittäisi pysäyttämään teknologisen singulariteetin toteutumista. [14, s. 3-4]

Yksittäisen kehityskulun kuvaaminen ei voida katsoa perustelluksi tulevaisuuden ennustamiseksi. Ei voida ennustaa tarkkaan yhden ajatusmallin kehittymisen toteutumista, vaikka voidaan ennustaa jonkun uuden ajatusmallin syntyminen tietyn ajan kuluessa tulevaisuudessa. Voidaan kuitenkin arvioida kehityskulkujen keskinäistä toteutumistodennäköisyyttä. [14, s. 4] Olisi epätieteellistä väittää, että ihmisen tasoisen tekoälyn toteuttaminen on mahdotonta. Toisaalta olisi väärin väittää, että ihmisen tasoisen tekoälyn olisi vaadittava askel kohti supertekoälyä. [14, s. 7]

## 4. YHTEENVETO

Työn tavoitteena ei ollut tehdä kattavaa kartoitusta Kurzweilin kirjan saamiin kirjallisuusarviointeihin. Työhön on kuitenkin saatu hyvin kerättyä arviointeja useilta alan arvostetuimmilta asiantuntijoilta. Lukijalle työ tarjoaa mahdollisuuden muodostaa oma mielipide ennustuksen mahdollisesta toteutumisesta ja lähtökohdat tutustua aiheeseen enemmän.

Tulevaisuuden ennustaminen on vaikeaa. Se vaatii historian tuntemusta ja sieltä vallitsevien kehityskulkujen tunnistamista. Vaatii myös syvällistä tuntemusta tieteenalasta, johon ennustus kohdistuu. Tämän lisäksi tarvitaan tietämystä ennustuksen tieteenalan kehitykseen mahdollisesti vaikuttavista muista tieteenaloista. Näiden kaikkien hallintaa Kurzweil on kirjassaan ansiokkaasti esittänyt.

Kurzweilin kirjan kiihtyvien tuottojen laille annettiin runsaasti tukevia kannanottoja. Eri kirjoittajat esittivät runsaasti erilaisia todisteita historiasta lain olemassa olosta. Eniten kritiikkiä saa lain soveltaminen tulevaan kehitykseen ilman minkäänlaisia epävarmuustekijöitä. On myös mahdollista, että olemme tietokoneiden kehityksessä lähestymässä S-käyrän keskikohtaa ja nykyinen eksponentiaaliselta vaikuttava kasvu tulee hidastumaan tulevaisuudessa.

Kurzweil on ehkä jättänyt liian vähälle huomiolle yhä monimutkaistuvien tietokoneiden energian tarpeen. Energiantuotanto on ala, joka on epäonnistunut pysymään kiihtyen tuottojen lain mukaisessa kehitysvauhdissa. Tämä voi hyvinkin olla yksi epävarmuustekijöistä, jotka vaikuttavat Kurzweilin kirjan ennustuksen toteutumiseen.

Aivojen simulointi tietokoneella saa huomattavasti ristiriitaisemman vastaanoton. Aivojen tutkimus on selvästi edistynyt, mutta kehitys on vaikeammin arvioitavaa. On myös mahdollista, että evoluution kehittämät ihmisaivot eivät ole helposti muokattavissa paremmiksi. Tämä merkitsisi, että simuloitujen ihmisaivot eivät mahdollistaisi superteokoälyä.

Kurzweilin aikataulu teknologiselle singulariteetille vaikuttaa liian optimistiselta. Tähän on voinut hyvin vaikuttaa halu olla todistamassa tapahtumaa itse. Ennustus on laadittu niin, että toteutusvuotena hän olisi mahdollisesti elossa. Ihmisillä on myös taipumus yliarvioida teknologinen kehitys lyhyellä aikavälillä. Tämäkin on voinut olla vaikuttava Kurzweilin ennustuksen optimismiin. Teknologisen singulariteetin toteutuminen vaikuttaa kirjoittajien mielestä hyvin mahdolliselta. Useimmat ennusteet sijoittavat teknologisen singulariteetin toteutumisen vasta tämän vuosisadan loppupuolelle.

Mielestäni lähteiden perusteella teknologisen singulariteetin toteutuminen on hyvinkin mahdollista. Ajankohdan ennustaminen on vaikeaa. Ihmisillä on selvästi vaikeuksia ennustaa tulevaisuutta useamman vuosikymmenen päähän. Tästä syystä tarkkojen ennusteiden

den tekeminen singulariteetin toteutumisesta ei ole perusteltua. Tämä koskee sekä singulariteetin mahdollistavaa teknologiaa että toteutumisaikataulua. Parhaimmillaan voimme tehdä ennustuksia erilaisista kehityskuluista ja arvioida niiden välisiä todennäköisyyksiä. Tämä menetelmä ei auta arvioimaan kehityskulkuja, joita ei pystytä tällä hetkellä edes kuvittelemaan.

## LÄHTEET

- [1] V. Vinge, Technological Singularity, 1993. Saatavissa (viitattu 20.1.2018): <https://www.frc.ri.cmu.edu/~hpm/book98/com.ch1/vinge.singularity.html>
- [2] V. Luckerson, 5 Very Smart People Who Think Artificial Intelligence Could Bring the Apocalypse, 2014. Saatavissa (viitattu 24.2.2018): <http://time.com/3614349/artificial-intelligence-singularity-stephen-hawking-elon-musk/>
- [3] R. Kurzweil, The Singularity is Near: when humans transcend biology, London: Duckworth Overlook, 2005, 652 p. ISBN: 0715635611
- [4] V. Vinge, Marooned in Realtime, New York: Bluejay Books, 1986, 270 p. ISBN: 0312924958
- [5] V. Vinge, The Coming Technological Singularity, 1993. Saatavissa (viitattu 20.1.2018): <https://edoras.sdsu.edu/~vinge/misc/singularity.html>
- [6] Seagate blog, Seagate's Fastest, Largest and Densest SSDs in the World, 2017. Saatavissa (viitattu 11.3.2018): <https://blog.seagate.com/intelligent/fld-explained-a-recap-of-seagates-fastest-largest-and-densest-ssds-in-the-world/>
- [7] TOP 500 The list, The 500 most powerful commercially available computer systems, 2018. Saatavissa (viitattu 11.3.2018): <https://www.top500.org/system/178764>
- [8] Digital Trends, AMD has the world's fastest graphics card with the Vega Frontier Edition, 2017. Saatavissa (viitattu 15.4.2018): <https://www.digitaltrends.com/computing/amd-vega-frontier-edition-graphics/>
- [9] M. Shanahan, The Technological Singularity, Berlin: Springer-Verlag, 2015, 272 p. ISBN: 0262527804
- [10] V. Callaghan, R. Yampolskiy, S. Armstrong and J. Miller, The Technological Singularity: Managing the Journey, Berlin: Springer-Verlag, 2017, 261 p. ISBN: 9783662540312
- [11] N. Bostrom, Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies, Oxford: Oxford University Press, 2014, 415 p. ISBN: 9780198739838



- [12] A. Eden, J. Moor, J. Søraker, E. Steinhart, *Singularity Hypotheses: A Scientific and Philosophical Assessment*, Berlin: Springer-Verlag, 2012, 441 p. ISBN: 9783642325599
- [13] B. Goertzel, Human-level artificial general intelligence and the possibility of a technological singularity: A reaction to Ray Kurzweil's *The Singularity Is Near*, and McDermott's critique of Kurzweil, *Artificial Intelligence*, Volume 171, Issue 18, 2007, pp. 1161-1173. Saatavissa (viitattu 20.3.2018): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0004370207001464>
- [14] A. Potapov, Technological Singularity: What Do We Really Know?, *Information*, Volume 9, Issue 4, 2018. Saatavissa (viitattu 22.4.2018): <http://www.mdpi.com/2078-2489/9/4/82/htm>
- [15] C. Last, Cosmic Evolutionary Philosophy and a Dialectical Approach to Technological Singularity, *Information*, Volume 9, Issue 4, 2018. Saatavissa (viitattu 22.4.2018): <http://www.mdpi.com/2078-2489/9/4/78/htm>
- [16] Teollisuuden Voima Oyj, Olkiluoto 3 -ydinvoimalaitosyksikkö. Saatavissa (viitattu 4.4.2018): <https://www.tvo.fi/Ol3>
- [17] Tekniikka & Talous, Kiinalaisjättiläisvoimala 1550 MW ja 43 km<sup>2</sup> - Suomen suurin aurinkovoimala alle tuhannesosa, 2017. Saatavissa (viitattu 4.4.2018): <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/kiinalaisjattivoimala-1550-mw-ja-43-km2-suomen-suurin-aurinkovoimala-alle-tuhannesosa-6669106>